

“十二五”国家重点图书出版规划项目
黑龙江省精品图书出版工程

水下无人航行器

SHUIXIA WUREN HANGXINGQI


魏延辉 白 涛 周雪梅 编著



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

水下无人航行器

魏延辉 白 涛 周雪梅 编著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书介绍水下航行器的稳定性分析方法、控制理论、数学建模、参数的系统辨识,在充分分析该领域最新的先进研究成果的基础上,为超空泡、AUV、ROV、鱼雷四种典型的水下无人航行器提供翔实的分析过程和仿真实例,针对不同控制对象提供相应的控制模型和控制方法。

本书可作为从事水下航行器的研究和设计人员的参考书,也可作为大专院校的本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

水下无人航行器/魏延辉,白涛,周雪梅编著.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2015.8
ISBN 978-7-5661-1081-7

I. ①水… II. ①魏… ②白… ③周… III. ①可
潜器—研究 IV. ①U674.941

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第159885号

选题策划 史大伟
责任编辑 叶 津
封面设计 恒润设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街124号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 19
字 数 486千字
版 次 2015年8月第1版
印 次 2015年8月第1次印刷
定 价 46元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

作为人类探索和开发海洋的助手,水下无人潜水器特别是智能水下机器人将在这一领域显示它们多方面的用途。水下无人潜水器系统及其探测技术是国家中长期科技发展纲要支持的重点,对其开发和研究能够满足国家对海洋开发的战略要求。

《水下无人航行器》是一本介绍多种水下无人航行器控制方法的书籍,本书根据不同形式的水下无人航行器的特点,介绍目前世界上最新的研究成果,同时结合作者多年的研究成果,介绍不同控制系统的特点和方法,为广大读者和同行们提供参考依据,为加快水下无人航行器的发展起到一定的推动作用,具有很高的学术价值和社会意义。

本书是作者结合自己在该领域多年的研究成果撰写而成的,书中的试验方法和见解有很多独到之处,重要的是书中的几位作者研究的方向各不相同,魏延辉主要开展水下 AUV 和 ROV 方面的研究工作,白涛主要研究超空泡和水雷方面,周雪梅主要研究领域在基础控制理论方面,对多种水下无人航行器有很精深的研究。本书与目前市场上介绍单一水下无人航行器的书籍相比,提供了更多可资借鉴的途径和方法。

本书能够出版,首先感谢国家自然科学基金委(基金编号:51205074,51309058)、国家科学技术部国际科技合作项目(基金编号:2014DFR10010)和中央高校基本科研经费(基金编号:HEUCF041505)给予本书的资金支持;本书总结和引用了该领域许多前辈和专家的研究成果,如蒋新松、徐德民院士,黄震中、杨保生、严卫生、石秀华、荣建德等专家、学者,在此向他们表示崇高的敬意和由衷的感谢;在此也对参与本书资料收集和整理工作的杜振振、周卫祥、何爽、王泽鹏、陈巍和韩寒同学表示感谢。

限于编者的学识和能力有限,本书难免存在缺陷和不足,恳请同行专家和广大读者批评指正,共同促进这一领域研究的深入开展。

编著者
2015 年 7 月

目 录

第1章 导论	1
1.1 水下无人航行器的发展与分类	1
1.2 水下无人航行器控制系统概念、特点、组成及原理	11
1.3 水下无人航行器动力学模型技术 ^[13]	12
1.4 水下无人航行器控制系统分析与设计	13
1.5 水下无人航行器控制系统仿真 ^[27]	17
参考文献	18
第2章 水下航行器的建模与动力学分析	20
2.1 基本数学知识	20
2.2 连续控制系统的数学模型	27
2.3 离散控制系统的数学模型	40
2.4 水下航行器的动力学分析	50
2.5 水下航行器的参数辨识	58
参考文献	63
第3章 水下航行器控制系统的稳定性分析与初步设计	65
3.1 引言	65
3.2 控制系统稳定性概念与分析	65
3.3 控制系统的相对稳定性	71
3.4 控制系统的鲁棒稳定性	74
3.5 线性系统的结构分析——可控性和可观测性	76
3.6 运动稳定性的基本定义	82
3.7 水下无人航行器运动稳定性的定义	83
参考文献	91
第4章 水下航行体运动的动态特性分析	92
4.1 引言	92
4.2 动态特性的一般分析方法	93
4.3 水下航行体的模型	103
4.4 鱼雷的纵向动态性质分析	114
4.5 小结	117
参考文献	117
第5章 水下航行体的执行机构及其扩展对象的分析与设计	119
5.1 概述	119
5.2 执行机构分类	119
5.3 执行机构的传递函数及特性分析 ^[2]	127
5.4 带力矩平衡式舵机的执行机构的特性分析	132

5.5 执行机构设计方法与实现	137
参考文献	148
第6章 水下航行体的线性控制系统的分析与设计	149
6.1 概述	149
6.2 水下航行体控制系统设计的基本问题	149
6.3 水下航行体的稳定控制系统的原理及结构	152
6.4 水下航行体稳定控制系统的设计	155
参考文献	159
第7章 超空泡航行体的控制系统设计	161
7.1 概述	161
7.2 超空泡及超空泡航行体的工作原理	161
7.3 超空泡航行体的建模	168
7.4 超空泡航行体的控制系统设计	177
7.5 小结	195
参考文献	195
第8章 AUV 的控制器设计	197
8.1 AUV 概述	197
8.2 系统动力学建模方法	204
8.3 控制系统结构	219
8.4 基本控制回路	224
8.5 常用的控制算法	227
参考文献	235
第9章 ROV 的控制器设计	236
9.1 概述	236
9.2 ROV 推进器分布及推力计算 ^[18]	236
9.3 系统动力学建模方法	239
9.4 ROV 稳定性分析方法	243
9.5 基本控制回路	246
参考文献	247
第10章 鱼雷的控制器设计	249
10.1 概述	249
10.2 鱼雷控制系统的组成与基本原理	250
10.3 鱼雷自动控制系统设计的一般步骤	252
10.4 控制指标	254
10.5 鱼雷运动数学模型	260
10.6 基本控制回路	267
10.7 常用的控制算法	279
参考文献	297

第 1 章 导 论

20 世纪 90 年代以来,潜艇在水下战场中的作用已发生了明显变化,被越来越多地应用于近海海域来支援联合作战。然而,这对价格昂贵的常规潜艇及核潜艇来说,风险无疑是增加了。尤其是体积大、吨位大的潜艇,根本无法在近海浅水海域作战,即使是在水深 100 m 以上的近海活动,也很容易被对方反潜兵力发现和攻击。与此同时,海军需要隐形的无人驾驶系统到传统海上力量无法到达的地方收集情报和攻击目标;而开展非战斗性海军活动,如搜集气象和海洋数据等,也需要考虑使用无人驾驶系统,以提高质量、降低费用。在这种情况下,水下无人航行器便脱颖而出。目前,世界上已有十多个国家在研究它了。

水下无人航行器(Unmanned Underwater Vehicle,UUV)^[1]是指用于水下勘探侦察、海洋工程、水下作业和水下作战等具有一定智能的小型水下自航载体。随着 UUV 的广泛应用,UUV 不仅在水下作战中扮演重要角色,在许多民用过程中也起着不可替代的作用。因此,UUV 实际上是一个概括的说法,它包括自主水下无人航行器(Autonomous Underwater Vehicles,AUV)、遥控航行器(Remotely Operated Vehicles,ROV)、鱼雷及超空泡等。

1.1 水下无人航行器的发展与分类

1.1.1 水下无人航行器的发展

现代的 UUV 的祖先是 Whithead 在 1868 年完成的自动推进水雷。美国海军在 1958 年开始研制有缆的水下救生装置,即遥控水下无人航行器(ROV)。当时,主要是代替潜水员进行深水探测、沉船打捞和水下电缆铺设及维修。1963 年,美国海军利用 ROV 搜索沉入 1 400 m 深海底的美国军舰“长尾鲨”号^[2]。1966 年美国海军利用 ROV 侦察并参与打捞沉入地中海 870 m 深海底的 8 枚氢弹。然而 UUV 的潜在商业价值直到北海岸发现了近海岸的石油和天然气田才被认识到。

从 1953 年第一台 UUV 下水,1974 年增加到 19 台,1979 年 ROV 已达到 139 台,1987 年突破 1 200 台,而 1991 年达到近万台。现在它已经成为水下观测和水下作业最有效的工具,在海洋开发、矿藏勘探、油气开发和其他矿藏的开采、水下打捞、油气管道巡检与维护、军事侦察和攻击等领域得到广泛的应用^[3]。

由于水下无人航行器在未来战争中具有极为广阔的应用前景,因此发达国家投入了大量的人力、物力致力于这类高科技武器装备的研发。目前,世界上有十几个国家正在从事水下无人航行器的研制,包括美国、英国、法国、德国、意大利、挪威、瑞典、葡萄牙、丹麦、日本、加拿大、俄罗斯、韩国、澳大利亚等,已研制出多型样机,并已有部分商业化产品投入使用。其中,美国、俄罗斯、日本和西欧国家等处于领先地位,在水下无人航行器的导航、控制、环境感知、能源与动力等关键共性技术方面取得了较大进展,使水下无人航行器的自主水平不断提高,续航能力大幅度增加。

随着无人机、无人战车、机器士兵投入战场并发挥重要的作用,无人化战争距离我们越来越近了。美国海军希望到 2020 年能拥有 1 000 套 UUV 服役,参与未来的海战,形成“水面航母战斗群+水下 UUV 作战系统”的无敌舰队,进一步巩固其“海上霸主”的地位。2004 年美国海军按照新的水面、水下联合作战的思想要求,修订了 UUV 发展计划,强调提高 UUV 与潜艇、水面舰艇的信息联通能力;2005 年美国海军公布了经过大规模修订后的 UUV 计划,明确了 UUV 的发展类型,并强调续航力需突破 100 h。美国海军一直致力于提高 UUV 的性能,未来 50 年的战略规划主要内容有布放和回收装置,信息采集和传输系统,海底、水中、水面及地面作战协调^[4]。

美国海军 1994 年公布了一项新一代先进水下无人航行器的研制计划,旨在发展两种能进行探雷和扫雷的自主式水下无人航行器。一种是尺寸类似重型鱼雷的大型水下无人航行器,直径 533 mm,可从潜艇鱼雷发射管发射,并可携带多种传感器,能长时间自主执行情报搜集、监视和侦察及猎雷任务。这种水下无人航行器可充分利用现役平台,特别是攻击型潜艇,以期获得最大的作战效果。另一种是小型水下无人航行器,主要用于水雷对抗,直径 200 mm,长度通常小于 3 m。

美国海军水下作战中心、美国国防高级研究计划局和美国海军研究生院等单位主要负责 UUV 的研制工作,经过二十多年的发展,美国在 UUV 研究领域处于国际领先水平,在导航、控制、水声通信和推进等关键技术方面取得了很多的研究成果。

美国海军正在试验的一种智能型 UUV“海底滑行者”,体长 1.8 m,直径 300 mm,翼展 1 m,质量 52 kg。它可自主在海中潜行 6 个月,行程 5 000 km,最大下潜深度 1 000 m,可由航空器投放,也可由人工海面投放。“海底滑行者”能担负探测水雷和水面目标的任务。若更换模块,它也可成为水下通信网络的一个移动式自主中继的节点。

美国海军海上系统司令部主持研制的“飞行”1 型水下无人航行器计划于 2007 年装备部队。它具有跟踪潜艇、反水雷和海域监视、侦察等多种功能,靠潜艇鱼雷发射管发射和回收。“飞行”1 型直径 530 mm,包括航行和任务两个系统,每个系统又分多个模块,配有信号接收桅杆。“飞行”2 型于 2009 年装备部队。它比“飞行”1 型尺寸大,任务载荷多,航程远达 280 km,续航时间 200 h。

目前,美国海军研究计划局(ONR)和步吕芬机器人技术研究所正合作研制一项新型 UUV 项目——自主式作战空间准备航行器(BPAUV)。该种 UUV 由锂聚合物蓄电池驱动,可通过潜艇或小型渔船投放。BPAUV 装备了多种传感器和侧视声呐,用于大面积海底地图测绘以及水道测量和水雷搜索任务。美国海军研究计划局在 2007 年进行水下无人航行器与无人水面小艇联合,自主进行猎雷作业,并利用水下无人航行器完成远程探测掩埋式水雷等任务的技术演示。

美国 Nekton 公司的 Micro Hunter 是世界上迄今为止最小的 Mini-AUV,如图 1-1 所示。Micro Hunter 开发于 2000 年,只有一根香烟大小,带有温盐深传感器,质量 70 g,设计深度 100 m,巡航范围大于 30 km,速度约 1 m/s。其背部为稳定翼,只有艏部一个螺旋桨是动力部分。其借鉴了草履虫螺旋游动的仿生原理,但由于装置过于简单,增加了控制的难度。Nekton 公司最终承认运动控制并不十分成功。

REMUS(Remote Environmental Monitoring Units,远距离环境监测装置)系列是美国 Hydroid 公司的智能水下无人航行器系列,共有 REMUS-100,REMUS-600,REMUS-6000 三个型号。REMUS-100 为微小型,REMUS-600 为小型,REMUS-6 000 为中型水下无人

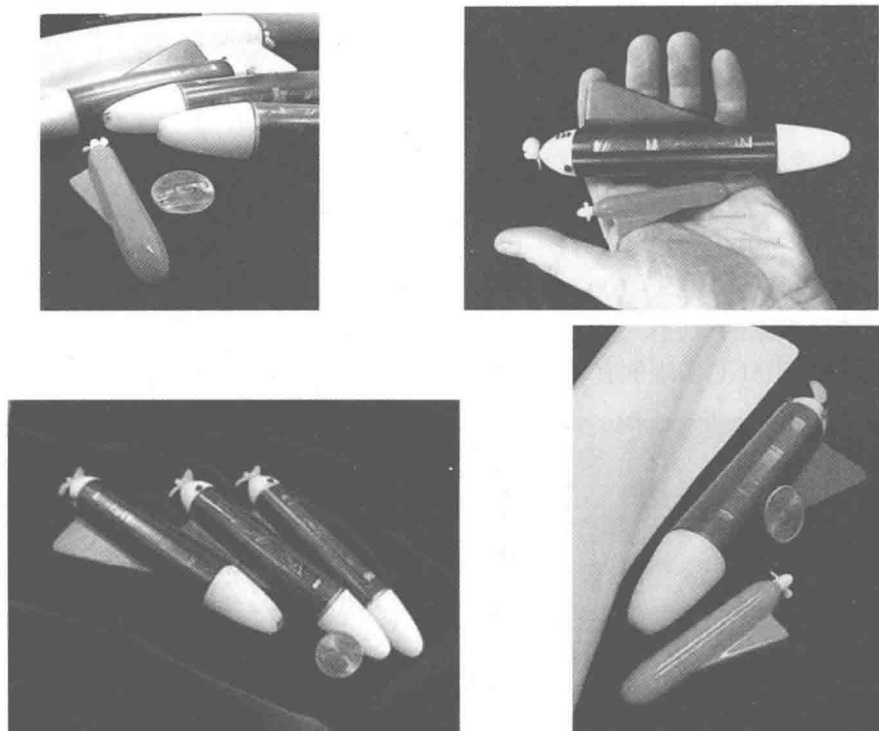


图 1-1 Nekton 公司的 Micro Hunter

航行器。

REMUS-100 指标如表 1-1 所示。

表 1-1 REMUS-100 指标参数

最大直径	19 cm(7.5 in)
最大长度	160 cm(63 in)
空气中质量	37 kg
最大潜深	100 m(328 ft)
能量	1 kW · h 可充电锂电池
推力器	直流无刷电机,3 叶桨
控制	两连接翼,可控艏向和纵倾
速度	最大速度 2.6 m/s(5 kn)
外部连接	两针以太网,四针串行通信
导航装置	长基线,超短基线

注:①1 in=2.54 cm

②1 ft=0.304 8 m

REMUS-100 标准装备有多普勒速度计、侧扫声呐、长基线、超短基线、传导率和温度传感器、压力传感器,可选装备包括声学 Modem、声学图像系统、水下摄像机、惯导设备、GPS、

荧光计、照明灯和混浊度传感器等。其配套设备包括网关联系浮标,最多可允许 4 个 REMUS 进行水下无人飞行器合作。设计目的为水文调查、雷区搜索、海湾安全业务、环境监测、飞机残骸探查、搜索和海中救助、渔业业务、科学采样和标图。

REMUS - 100 由于其卓越的性能已经被多国军方采购,英国、美国军队已经将其用于军事目的,德国海军测试中心也试图对其进行性能测试实验,以便装备德国海军。美国更是世界上第一个将 AUV 应用于真实雷场的国家。2003 年,美国海军在伊拉克 Umm Qasr 海港外海运用 REMUS - 100 清扫了 1991—1992 年第一次海湾战争时期伊拉克军队布放的鱼雷,如图 1-2 所示。REMUS - 100 利用其装备的侧扫声呐,发现了数枚鱼雷并进行了图上标定。随后美国海军的“海豚”进行了可疑目标的进一步探查,并最终将其摧毁。这是世界上第一次成功运用 AUV 实现的真实雷场的搜索,REMUS - 100 在这次搜索中大展身手。

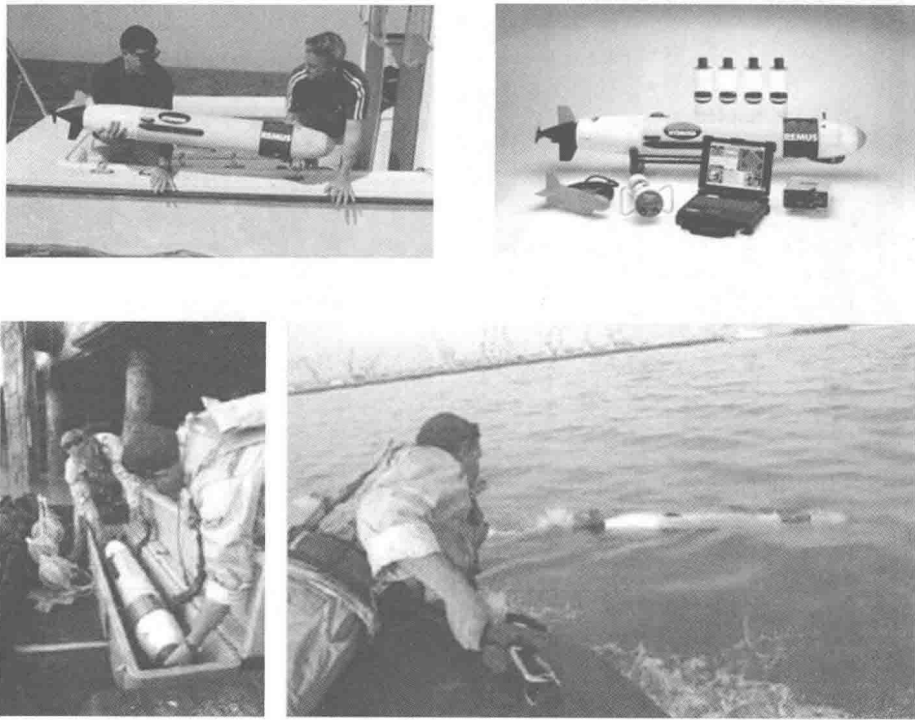


图 1-2 REMUS - 100 在伊拉克战争中投入使用

SEA SQUIRT 如图 1-3 所示,建造于 1988 年,长 1 m,是麻省理工水下无人飞行器实验室的第一台 AUV,也是水下无人飞行器的鼻祖之一。其耗资 40 000 美元,导航设备为长基线,曾用来测定波士顿港和许多湖泊水中的氧浓度、浑浊度、温度和盐度。至今,SEA SQUIRT 仍然作为麻省理工水下无人飞行器实验室的软件和设备实验平台使用。

美国 Nekton 公司研制的低成本、单一任务的水下无人飞行器“巡逻兵(Ranger)”装有温盐深、叶绿素、含氧量等传感器,主要用于海洋环境监测及多水下探测器的协调控制研究。

可实际应用的最小 Mini - AUV: 弗吉尼亚工学院的 VT Miniature AUV (Miniature Autonomous Underwater Vehicle)。Virginia 工学院电子与计算机工程系于 2003 年开始研发水下无人飞行器——VT Miniature AUV,如图 1-4 所示。其长 70 cm,直径 8.9 cm,期望速度 2~3 kn,期望巡航范围 30 km。由于微小型空间狭小,以及功率和散热的需要,研究人员



图 1-3 SEA SQUIRT

进行了大量的 PCB 设计,并没有采用现成的商用电路,因而保证了小尺寸下的电路正常工作。

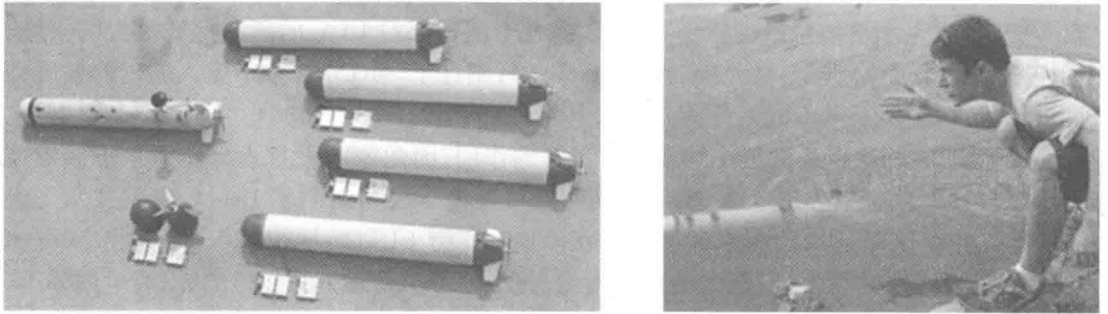


图 1-4 弗吉尼亚工学院的 VT Miniature AUV

Bluefin Robotics 公司的 Bluefin-9 的突出特点是电池以及数据记录模块可由水下无人飞行器顶部的小天窗取出,如图 1-5 所示。其自身携带侧扫声呐和温盐深传感器。Bluefin Robotics 公司宣称 Bluefin-9 由于其精确的航行控制系统可以不采用声学导航(如长、短基线)和惯性导航系统,但没有透露其采用的导航方式。另外,从取数据的天窗看,其耐压壳不具备较大深度的潜航能力,属于极浅水 AUV 的范畴。



图 1-5 Bluefin Robotics 公司的 Bluefin-9

Perry 公司推出的第二代“鲸鱼座 II”水下智能水下无人飞行器如图 1-6 所示,其主要传感器及其特征为微光 TV、鱼雷探测与识别声呐系统(MIRIS)、作业水深 10~160 m、识别目标的时间 1~3 min、探索速度(95%的探测概率)0.032 1 km²/h。

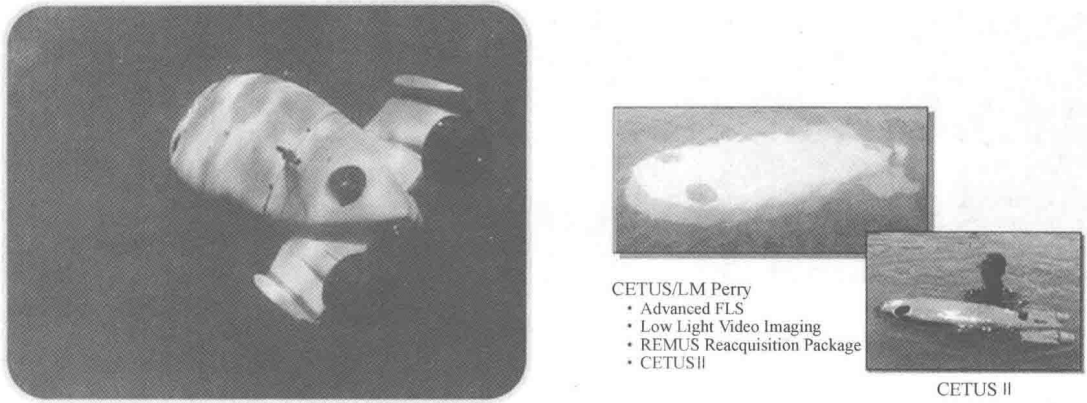


图 1-6 鲸鱼座 II

UUV 是未来水下信息战的新型平台,因而各个国家都对 UUV 的研制抱有极大的兴趣,也积极进行这方面的研究。“北约”在 2000 年 4 月制订了“MO2015 水下无人航行器发展计划”,目的是研制出一批不同用途的各型水下无人航行器。

德国潜艇在两次世界大战中均发挥了重要的作用,因此德国一直十分注重水下武器装备的研制,其中就包括 UUV。2005 年德国阿特拉斯电子公司研制了 DeepC 自主式水下无人航行器,并在比斯开湾的深水区进行演示。DeepC 型 UUV 质量约 2.5 t,作业水深可达 4 000 m,续航时间约为 40 h,最大装载能力为 250 kg,可执行水下管线检测、海底电缆铺设、海床勘探等任务。德国研制的“长尾鲛”一次性攻击型水下无人航行器(图 1-7),长度为 1.3 m,直径 0.2 m,质量 40 kg,航行深度 300 m,在航母 120 m 范围内活动,可对锚雷和沉底雷进行爆破处理。

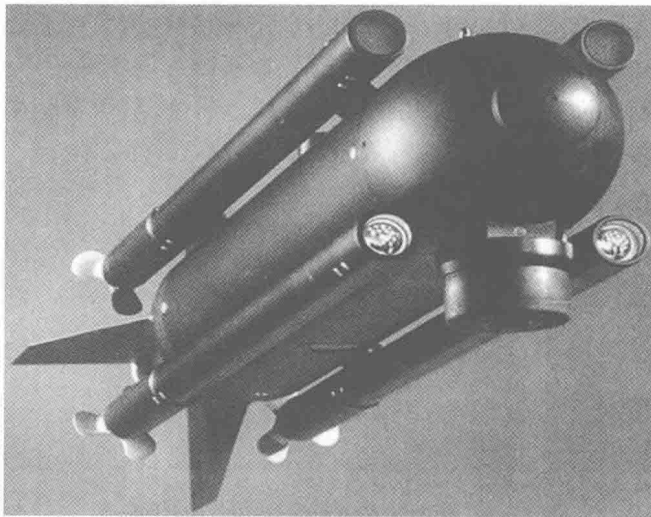


图 1-7 “长尾鲛”一次性攻击型水下无人航行器(Sea Fox)

1998 年英国开始“Morlin”UUV 的研制工作。近年来,英国国防部加快了对水下无人航行器的研究。2002 年 7 月,英国国防部装备管理局制订了一个为期 3 年的水下无人航行器

演示计划,旨在为将来制订近期、中期和远期水下无人航行器发展计划奠定基础。

法国提出了一种新的可重新配置的多用途反水雷装置概念,这一概念基于 Oilster 新型水下无人航行器。最近, Oilster 的样机进行了水下运行鉴定试验。Oilster 与其民用型有 90% 的部分是通用的,后者瞄准未来民用水下近岸市场。ECA 公司宣称,一种叫作 Ailster 的自治式 UUV 能够在水下 3 000 m 执行监视、绘图任务。采用高性能电池和先进的智能软件的 Ailster 可完全自治地运行 24 h 以上^[5]。

挪威的“水下排雷手”由两个驱动器驱动,最大攻击范围 4 km,用于对水雷进行一次性自主攻击。此外,瑞典、意大利也在研制用于扫雷的水下无人航行器。

俄罗斯早在 20 世纪 60 年代就开始研制水下无人航行器,主要用于探雷、猎雷、搜索和探测下沉核潜艇等。但其研制水平落后于欧美国家,用于搜索核潜艇的水下无人航行器主要有 MT-88 型和“泰菲络纳斯”型。其中,MT-88 型的航行深度为 6 000 m,续航力 6 h,巡航速度最快为 3.6 km/h;“泰菲络纳斯”型的航行深度为 2 000 m,巡航速度最快为 7.2 km/h。1987 年至 1989 年,苏联曾几次用 MT-88 型水下无人航行器成功地探测到本国下沉的核潜艇。2007 年,俄罗斯科学院远东分院海洋技术问题研究所研制的无人水下自动设备“古钢琴-1”号参与在北冰洋 4 300 多米深的海底插上了一面钛合金俄罗斯国旗的活动,该消息引起了世界各国的广泛关注。据俄专家称,这是世界上最好的可在寒冷条件下工作的水下设备。

日本为水下无人航行器的研制投入了 1.6 亿美元的资金,其 UUV 的研究内容包括:高能源密度、低寿命期费用的电池以及供电池用的新型催化剂及其制造工艺,无环境污染的推进系统及其高温燃烧室和紧凑高效的热机技术,用于平台外数据处理和任务监控的高数据率水下声通信技术,低成本的地形匹配/测绘精密导航系统,降低声和电磁信号的先进传感器技术、涂层技术和主被动消除技术,用于控制 UUV 的人工智能、神经网络和模糊逻辑等技术。其水下无人航行器技术已达到世界领先水平,但日本研制的水下无人航行器主要用于民用的深海开发,极少用于军事领域。由日本三菱重工业公司研制的 AUV-EX1 型水下无人航行器,潜航深度达到了 3 500 m,能够进行各种深海科学活动。此外,日本海洋科学中心研制的“海沟”号水下无人航行器于 1995 年 3 月 24 日成功地下潜到 10 911 m 的海底,创造了世界深潜纪录。

日本东京大学最新研制的微小型水下 AUV 试验平台“Tam-Egg”。采用镍-镉(Ni-Cd)电池,持续工作时间为 3 h,由四个 100 W 的推力器推进,装备有磁罗经(TCM2)、压力(深度)传感器、光纤陀螺、两台摄像机、四个声学搜索传感器、两台 LED 照明灯(图 1-8、图 1-9)。研制该探测器的目的是发展一种用于海底复杂结构(如沉船)探查的微小型探测器。

近些年,我国也开始重点支持水下无人航行器技术的研究。在小型化水下导航技术、小型化水下探测技术、仿生推进与操纵技术等方面取得了很大的进展。

我国无人遥控潜水器及自主式水下无人航行器从 20 世纪 60 年代中期就开始进行探索性研究,先后研制了“海人一号”“海人二号”水下试验床等。1995 年 8 月,“CR-01”号 6 000 m 无缆自治式水下无人航行器研制成功。2000 年制的“CR-02”号除具有“CR-01”的功能外,还具有更好的机动性能及对洋底地形、地貌进行探测和对洋底地形的跟踪能力和避碰与爬坡能力,“CR-02”具备进行多种深海资源调查的能力。图 1-10 所示为“CR-02”号。

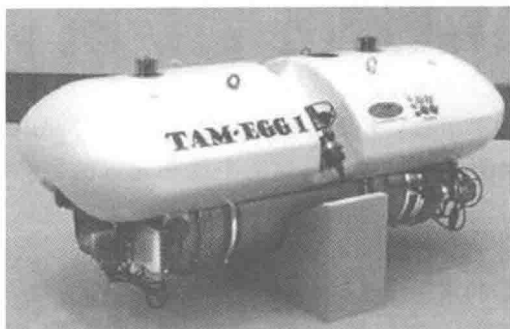


图 1-8 “Tam-Egg1”探测器



图 1-9 在水池中进行试验的“Tam-Egg1”

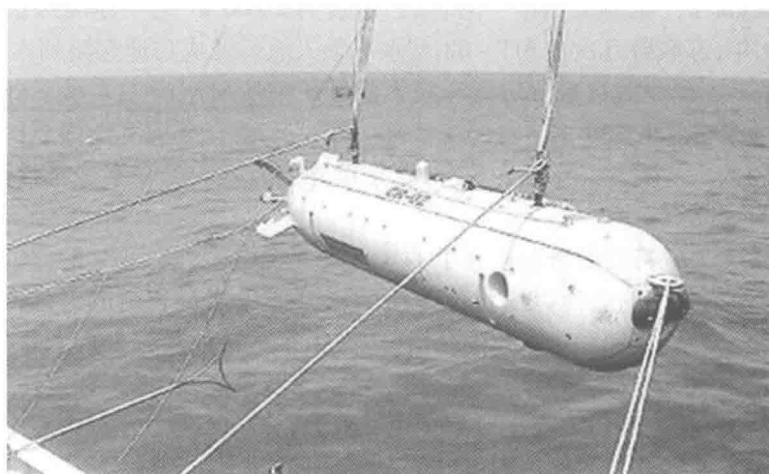


图 1-10 CR-02

2003年7月,中国第二次北极科学考察期间,沈阳自动化研究所研制的“海极号”水下无人航行器随船出征,于2003年9月成功完成科考任务。

1.1.2 水下无人航行器的分类

水下无人航行器最早是为了克服潜水员在深水中工作所遇到的困难,先后研制了结构各异和性能多样的潜水器,它是在潜艇技术微型化基础上发展起来的。

水下无人航行器的构造、工作原理、使用目的多种多样,原因是海洋工作种类非常多,而水下作业内容也丰富多样,可以军用,也可以民用。一般有以下几种分类(图1-11)。

1.1.2.1 按用途分类

按用途可分为作业用、观测用和测量用水下无人航行器。作业用水下无人航行器多带有机械手,用于海中救援、打捞、电缆铺设、海洋石油及其他生产系统的操作、维修等水下作业。观测用水下无人航行器与作业用基本相同,但它主要用于测定所要调查对象的参数。测量用水下无人航行器则是利用照相机、摄像机、声呐等传感器测量海底地形、地貌或搜寻海底下沉物。

1.1.2.2 按有无电缆分类

按在水下无人航行器和母船之间有无电缆可分为有缆水下无人航行器和无缆水下无人航行器。有缆水下无人航行器是通过电缆由母船向水下无人航行器提供动力和实施遥控;无缆水下无人航行器自带动力,依靠自身的动力航行。

1.1.2.3 按运动方式分类

按运动方式可分为浮游式、履带式 and 步行式水下无人航行器。浮游式水下无人航行器呈零浮力(或稍有一点正浮力),依靠所装的推进器在水下做三维空间运动。履带式水下无人航行器多用于海底施工。利用步行机构在海底行走的步行机器人正处于研制阶段。

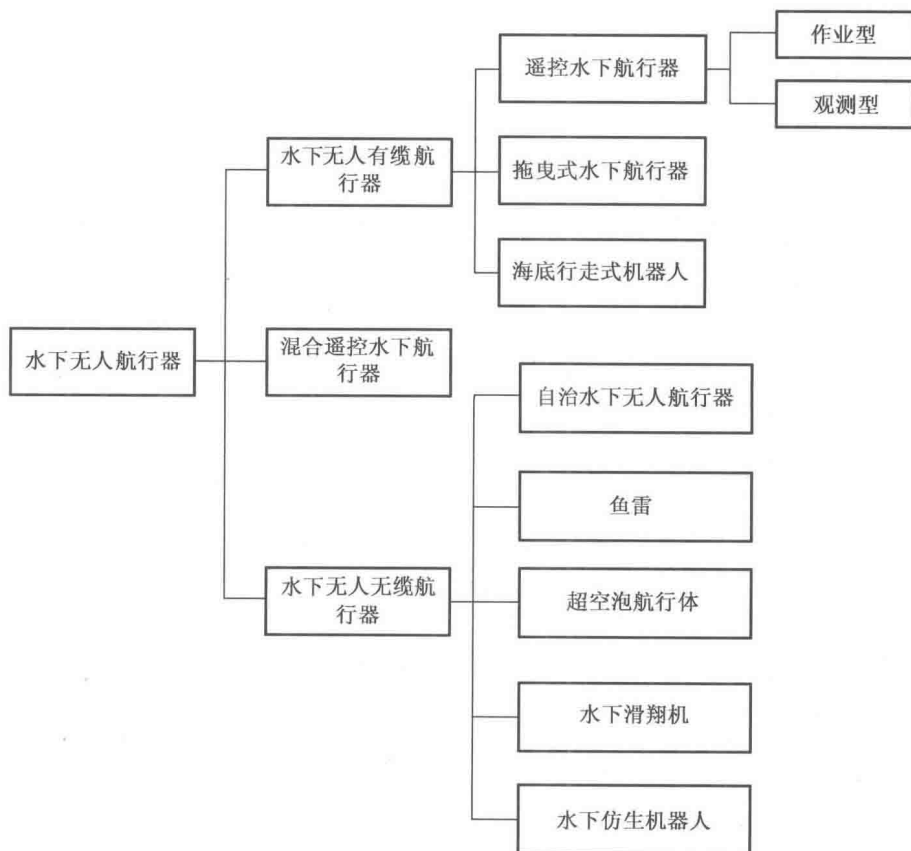


图 1-11 水下无人航行器的分类

1.1.3 水下无人航行器的发展重点和应用前景^[6]

为满足水下无人航行器多样化的任务,并能适应复杂的水下环境,未来水下无人航行器技术发展的重点将主要集中在以下几个方面。

1.1.3.1 开发新能源,提高续航力

水下无人航行器的续航能力主要是由所使用的电池决定的,电池性能的高低决定了水下无人航行器续航时间的长短。为了满足军事需要,未来的水下无人航行器必须具有远距离、长续航能力,如数月以上,目前核电池及太阳能电池都已经能够满足这一需求。电池的比能要求大于 $400 \text{ W} \cdot \text{h}/\text{kg}$,世界各国正开展纳米材料的研究,积极研究在电化学能存储和转换中采用纳米材料。纳米电极和电解液将使电池的性能空前提高。目前,先进国家正在开发一种新的动力源——放射性同位素电池。这种电池具有质量轻、寿命长、无须修理或补充等优点,可使水下无人航行器长期在水下航行。

1.1.3.2 变革通信方式,增强 UUV 的远距离通信能力

目前,水下无人航行器远距离的水下通信主要依靠光纤进行,这样使得水下无人航行器很难离开平台很远距离,而且限制了水下无人航行器在复杂海域执行任务的能力。未来水下无人航行器通信方式发展方向是大力发展高品质的声通信。通信方式的革新,将使水下无人航行器承担更加复杂的通信任务,成为全球通信体系中的一部分。

1.1.3.3 改进控制系统,重点发展自主式 UUV

海洋下的环境是异常复杂的,这就要求水下无人航行器具有很强自主性,能够在复杂的水文情况下自主与环境进行交互,有效识别水下物体。未来水下无人航行器应该具有很高的智能,能够自动判别海底形态,采取相应的措施和对策。针对外在情况的变化,自动进行适当的调整,完成指定的任务。

1.1.3.4 发展组合导航系统,提升 UUV 的精确定位能力

精确的导航定位能力是水下无人航行器成功执行任务的基本要素。最常用的且应用最早的导航方法是航位推算法,即将水下无人航行器的速度对时间进行积分来获得位置的信息。由于水下无人航行器在水下作业的时间越来越长,惯性导航的累计误差不能令人满意,精度偏低,而又不能频繁让水下无人航行器浮出水面,使用 GPS 卫星定位来修正惯性导航误差,另外也可能会因上下往返而减少其执行任务的时间。目前惯性导航、卡尔曼滤波器、多普勒声呐和水下环境地形导航技术(如地形轮廓跟随法、海底映像/地图匹配法以及其他的地球物理技术)等精密导航装备已渐渐应用到水下无人航行器上。在惯性导航系统中,通过将加速度对时间两次积分来获得位置的信息,这种导航方法的优点是自主性和隐蔽性好。未来的水下无人航行器上可以将多种导航技术适当地组合起来,不仅可以取长补短,大大提高导航精度,而且可以适当地降低单一导航系统的精度,从而可以降低导航系统的成本和技术难度。此外,组合导航系统还能提高系统的可靠性和容错性能。

1.1.3.5 研制多种模块,增强 UUV 的多任务作战能力

未来的水下无人航行器将进行模块化设计,根据任务的不同,可以加载不同的任务模块,以及适应未来的多任务作战需求。这些模块包括扫雷模块、反潜模块、电子战模块、诱饵模块等,通过这些模块化设计,使水下无人航行器具备更多的作战功能。还可以加载武器系统,比如各种类型的导弹和炸弹,甚至核弹头,这样水下无人航行器将具有强大的硬摧

毁能力,将成为海底的一个新兴霸主。

1.1.3.6 航行体体系结构

为降低成本、减少能源消耗,未来水下无人航行器的航行体技术将会向体积小、兼容性及模块化方向发展。一方面,高兼容性和模块化技术的应用将大幅度降低水下无人航行器的制造成本;另一方面,由于微机电系统技术的应用和装置的缩小,使得设计出体积更小的水下无人航行器成为可能,进而减少能源消耗。

1.1.3.7 改进控制系统,提高自适应能力

未来的水下无人航行器应该具有足够高的智能化程度,能够和环境发生交互作用,以便在水中执行任务时,能有效地探测和识别水下物体、取样、挂缆,或完成各种人力无法胜任的水下工作。未来的水下无人航行器将能够执行更为复杂的工作,在环境发生预料以外的变化时,应能够自行调整,以克服障碍。

1.1.3.8 注重多个水下无人航行器的协同作战

未来的趋势是向多个水下无人航行器间的彼此协调、共同执行任务的方向发展,无论是水文资料的搜集、海底调查还是鱼雷的反制,多个水下无人航行器同时作业的方式将获得更显著的效果。

除上述几个方面外,水下无人航行器的关键技术还涉及传感器技术、图像处理、视频图像的水声传输、位置偏差的修正方法等。通过开发更精确的速度传感器可延长大地定位间隔的时间,从而增加水下无人航行器在作业场所的时间,并提高隐蔽性。新型的换能器技术和计算机技术将为目标探测、避障和目标识别提供高分辨率的图像。

1.2 水下无人航行器控制系统概念、特点、组成及原理

水下无人航行器自动控制系统的的作用是操纵水下无人航行器沿着设定的轨迹航行^[7-8],当水下无人航行器在航行过程中受到干扰、偏离预定轨迹时,自动控制系统能操纵水下无人航行器返回到预定的轨迹,使其能按预定轨迹稳定航行。为了保证水下无人航行器按预定轨迹稳定航行,必须对水下无人航行器进行控制。

水下自航行器控制技术的研究主要包括:控制系统体系结构、导航策略、动力学建模、运动控制算法、路径规划、躲避障碍以及编队等^[9]。

水下无人航行器在空间运动上一般有6个自由度^[10],如图1-12所示,其中包括重心空间运动的3个自由度和水下无人航行器绕重心转动的3个自由度,可分别描述为前进后退、上升下降、左移右移、转向、俯仰和横滚运动,而这6个独立变量称为水下无人航行器的运动参

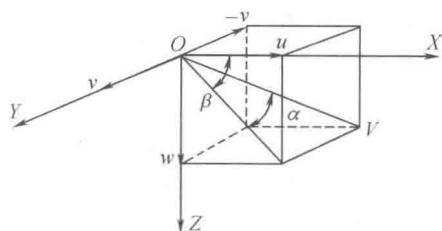


图1-12 水下无人航行器运动控制模型